Las fundaciones del puente sobre el Río Negro en Paso del Puerto

Prof. CARLOS E. BERTA

Pocos temas hay, en el campo de los procedimientos de construcción, que hayan dado lugar a tan diversas y abundantes descripciones y comentarios como los métodos de ejecución de las fundaciones hidráulicas. El hecho es explicable, porque la extrema variedad de los factores que acompañan en la práctica a tales obras justifica el interés de esas informaciones, ya que por muchos que sean los antecedentes que ofrece la bibliografía relacionada con esa clase de trabajos, se presentan con frecuencia casos en que los factores locales imprimen al problema constructivo una fisonomía inusitada, que no ajustándose enteramente a precedentes conocidos, obliga al técnico a apartarse de los procedimientos habituales y a ensayar otros nuevos.

Esta reflexión de carácter general induce a suponer que en el caso del puente sobre el Río Negro en Paso del Puerto, puede ofrecer algún interés una breve reseña de las condiciones en que se planteó el problema de las fundaciones, y una descripción de la solución adoptada para la más profunda, y aparentemente más difícil, de todas ellas.

De acuerdo con el proyecto que sirvió de base al contrato de construcción, el puente constaría de cinco bóvedas iguales, de cincuenta metros de luz, apoyadas sobre estribos y pilas de hormigón ciclópeo fundadas sobre el banco de roca por medio de

patines de hormigón armado. El puente fué construído en la forma proyectada, salvo en lo referente a las fundaciones de las pilas del cauce, en las cuales se interpuso, entre el patín y la roca, un macizo de hormigón ciclópeo de varios metros de espesor, con lo que se logró simplificar, como veremos más adelante, el problema constructivo. La fig. 2 muestra una sección de la pila III tal como fué construída.

En Paso del Puerto, el Río Negro corre en un cauce estrecho, entre barrancas muy escarpadas. En ese paraje, situado aproximadamente en el comienzo del tercio inferior del curso, el río ha recibido ya el aporte de sus principales afluentes, de modo

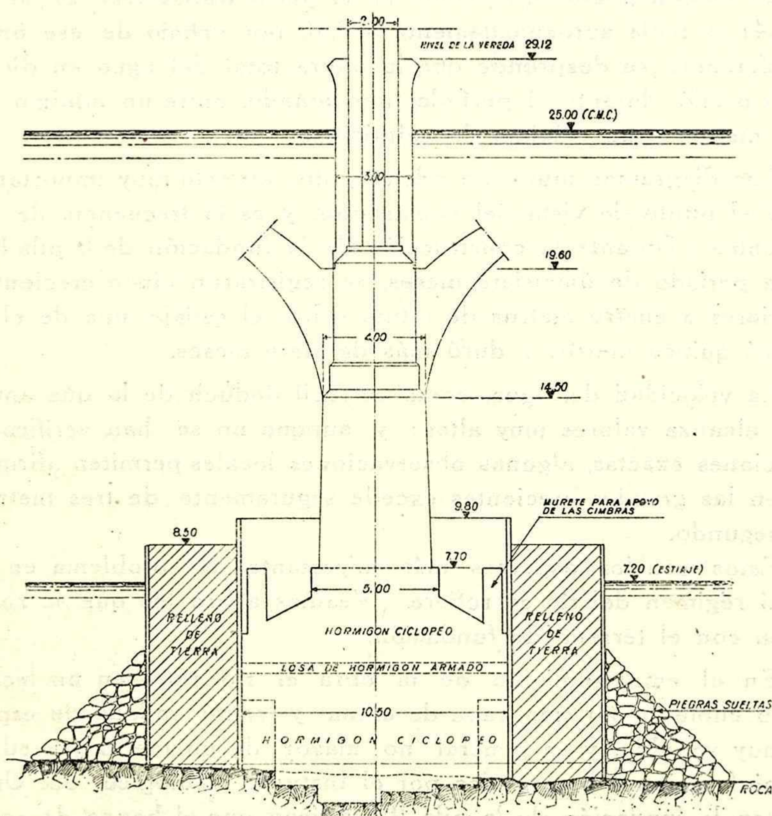


Fig. 2 — Puente sobre el Río Negro (Paso del Puerto).
Sección transversal de la pila III.

que trae casi todo el caudal que vierte en el Uruguay. Todo eso explica porqué las crecientes son allí muy pronunciadas y rápidas, en tanto que su descarga, es por el contrario, lenta.

La iniciación de las obras a que se refiere este artículo,—en 1936 — coincidió con el comienzo de un período de varios años durante el cual esas características se presentaron en forma particularmente acentuada. Los gráficos adjuntos, fig. 3, basados en observaciones diarias, muestran las alturas del río durante ese período.

La más alta creciente registrada, — (en Diciembre de 1940) — alcanzó a diecisiete metros sobre el nivel de estiaje, que está señalado en los planos a la altura 7.20, sobre un cero arbitrario. Como por otra parte el fondo del río en el emplazamiento de la pila III (según puede apreciarse en el perfil transversal de la figura 4) se halla aproximadamente a 0.50 por debajo de ese nivel de referencia, se desprende que la altura total del agua en dicho punto osciló, durante el período mencionado, entre un mínimo de ocho metros y un máximo de veinticinco.

Los diagramas muestran además otro aspecto muy importante desde el punto de vista del constructor, y es la frecuencia de las crecientes. Durante la construcción de la fundación de la pila IV, en un período de diecisiete meses, se registraron cinco crecientes superiores a cuatro metros de altura sobre el estiaje; una de ellas alcanzó quince metros y duró más de siete meses.

La velocidad del agua, como es fácil deducir de lo que antecede, alcanza valores muy altos; y aunque no se han verificado mediciones exactas, algunas observaciones locales permiten afirmar que en las grandes crecientes excede seguramente de tres metros por segundo.

Estos son los aspectos más importante del problema en lo que al régimen del río se refiere. Veamos ahora los que se relacionan con el terreno de fundación.

En el emplazamiento de la obra el río corre en un lecho rocoso cubierto por una capa de arena y canto rodado de espesor muy variable, y en general no mayor de un metro y medio. Las perforaciones practicadas por el Instituto Geológico del Uruguay en la fundación de la pila III, indican que el banco de roca está constituído por un manto de arenisca, de dos a tres metros de espesor, sano y compacto en su parte superior, y algo fisura-

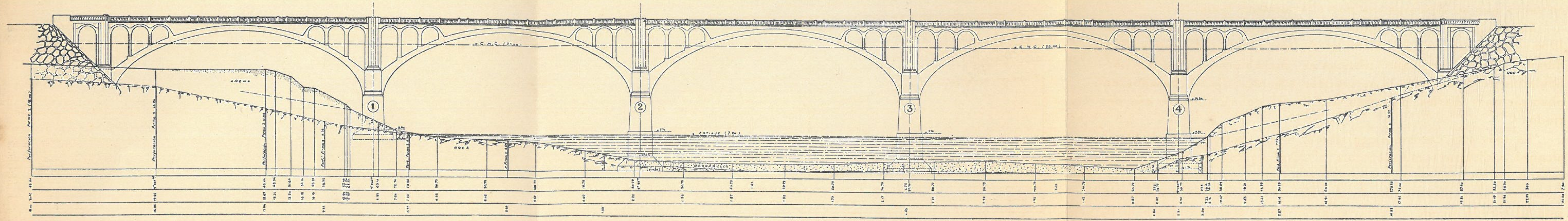


Fig. 1

(Reproducido de una de las piezas del proyecto con autorización de la Dirección de Vialidad).

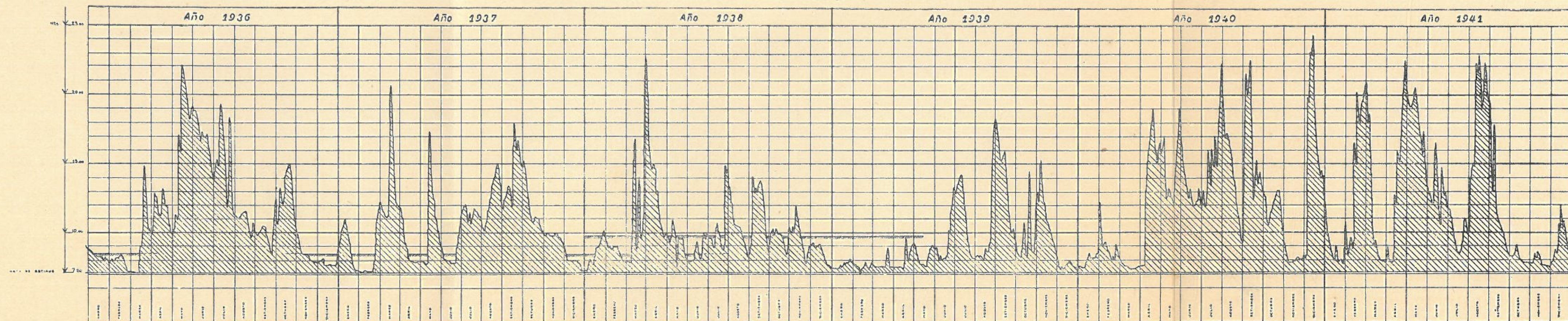
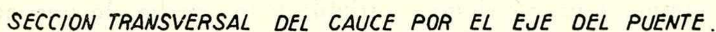


Fig. 3. — Alturas del Río Negro en el puente de Paso del Puerto durante el período 1936 - 1942.

do más abajo, al cual sigue un conglomerado duro, de cantos rodados y cemento silício o arcilloso.

La resistencia mecánica del material del banco, ensayada en trozos de testigos, resultó ser en todos los casos muy superior a la necesaria para resistir con seguridad las cargas de la estructura. Pese a este resultado, y debido a la presencia de la zona fisurada que ya hemos mencionado, se juzgó prudente adoptar las medidas necesarias para penetrar en el banco hasta dicha capa, y para corregirla o aún eliminarla, si su exámen directo lo aconsejara.

Fig. 4. — Puente sobre el Río Negro en Paso del Puerto.



(Reproducido de una de las piezas del proyecto con autorización de la Dirección de Vialidad).

El material suelto que, según ya hemos visto, cubre la superficie de la roca, puede en general ser removido con facilidad, o atravesado por tablestacas hincadas a percusión. En una de las fundaciones anteriormente construídas surgieron, no obstante, algunos inconvenientes, causados por la presencia de grandes fragmentos de roca, casi siempre sueltos, pero a veces adheridos todavía en algún punto al banco del que fueron recortados por un lento proceso de erosión. Eran por lo común bloques semejantes a losas delgadas incrustadas en una masa compacta de arena y canto rodado, mezclados a veces con arcilla en pequeña cantidad.

Muchos de esos fragmentos no pudieron ser retirados del lugar de la fundación, en un dragado previo ejecutado con grapos; y constituyeron luego una fuente de serias dificultades cuando se hizo necesario poner en seco la superficie del banco.

Las perforaciones practicadas por la Administración en la pila III no acusaron la presencia de bloques de esa especie; pero como el número de esas perforaciones era relativamente pequeño (una en cada uno de los vértices de un rectángulo de doce metros por catorce, y una en el centro del mismo) no pudo descartarse la eventualidad de que existieran algunos, en puntos no explorados del perímetro de la fundación.

Tales son a grandes rasgos, los factores que fué necesario tener en cuenta en la elección del procedimiento constructivo. El aspecto dominante del problema era la necesidad de excavar prolijamente un volumen considerable de material, en seco, y a una profundidad relativamente grande en el cauce de un río sometido a fuertes y frecuentes variaciones de nivel.

Dos procedimientos aparecían como aconsejables en estas circunstancias: la fundación por medio de cajones neumáticos y la construcción dentro de ataguías.

Desde un punto de vista puramente técnico, el empleo del aire comprimido habría constituído una solución ideal para la ejecución de las excavaciones; pero las continuas crecientes del río habrían representado, con todo, una grave dificultad, a causa de los riesgos e inconvenientes que presenta el trabajo con esta clase de equipos, a un nivel muy variable y en medio de una corriente a menudo impetuosa. Esta circunstancia, unida a inconvenientes de carácter incidental, tales como la dificultad de procurar el

plantel necesario, y de reclutar personal adiestrado, en cantidad suficiente, indujeron a considerar que este procedimiento, sin ofrecer garantías de completa seguridad, resultaría en último término exageradamente costoso, razón por la cual fué descartado.

Por el contrario, el procedimiento de construcción por medio de una ataguía, analizado en todos sus detalles, ofreció mejores perspectivas de adaptación a las condiciones locales ya descritas y apareció como el más viable, con los elementos de trabajo y el personal disponible en el país. Los resultados del procedimiento desarrollado con arreglo a esta idea, confirmaron, según veremos, esa suposición.

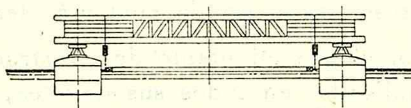
La ataguía a construir, aún sin ser esencialmente distinta en términos generales, de las corrientes en los trabajos hidráulicos, debía enfrentar, no obstante, condiciones muy severas, que obligaban a prestar particular atención a los siguientes aspectos:

1.° Debía ser ante todo, muy rígida y estable. Ya hemos visto que la velocidad de la corriente, en las crecientes, alcanza valores muy altos. Para la ataguía adoptada en definitiva el empuje consiguiente podía llegar a exceder de cien toneladas en caso de inmersión total, contingencia que era forzoso prever dada la frecuencia y amplitud de las oscilaciones del nivel del río. Por tanto la estructura tendría que ser a un tiempo muy pesada y muy sólida para evitar toda posibilidad de arrastre o de deformación por la corriente. Es oportuno señalar que el anclaje de la ataguía por medio de amarras tendidas hasta las orillas habría sido un procedimiento de dudosa eficacia, a causa de la gran longitud de los cables.

2.° Debía ofrecer un márgen de altura, por encima del estiaje, bastante grande para reducir en grado aceptable la contingencia de inmersión total, y con ella, la duración de los períodos de interrupción del trabajo. Esta condición es opuesta en sus consecuencias a la anterior, pués es evidente que al aumentar la altura de la ataguía, aumenta también el riesgo de destrucción.

3.° La elevada presión del agua exterior, las dimensiones de la ataguía y la naturaleza del material suelto que cubría el banco de roca, eran motivos para prever entradas de agua considerables, que podrían entorpecer los trabajos en el interior de la ataguía y ocasionar gastos de bombeo exagerados, a menos que se adoptara un tipo de pared muy impermeable, y se prestara particular aten-

Puente sobre el Río Negro. (Paso del Puerto). Construcción y colocación de la ataguia de la pila III.



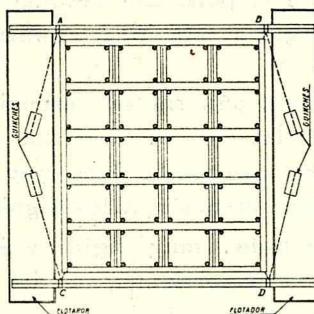


Fig. 5

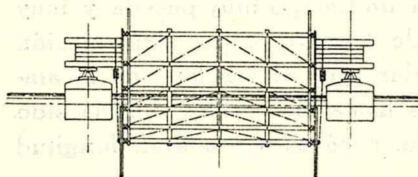


Fig. 6

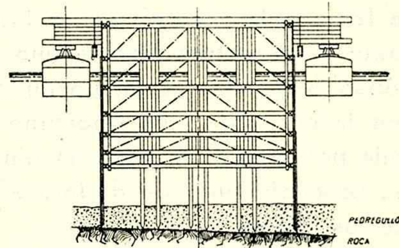


Fig. 7

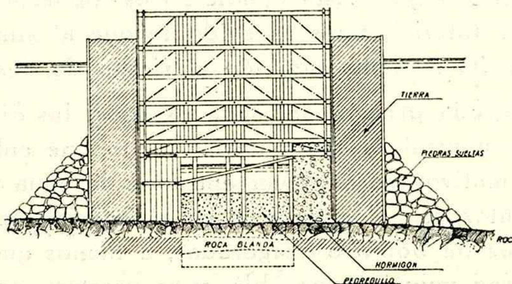


Fig. 8

ción al procedimiento de sellado del borde inferior con el suelo de roca.

4.° El procedimiento de construcción de la ataguía tendría que ser previsto en forma tal que permitiera reducir al mínimo el período de tiempo en que la obra, parcialmente construída, en medio del río, se hallara más expuesta al riesgo de destrucción por la corriente; o, en otros términos, que abreviara y simplificara las operaciones a ejecutar en el cauce hasta la consolidación de la obra. Esta condición era imperativa, pues los períodos de bajo nivel entre dos crecientes sucesivas solían ser, como muestra el diagrama de alturas, muy breves.

Los principales aspectos de la ataguía proyectada y construída de acuerdo con estas directivas, pueden apreciarse en las figuras 5, 6, 7 y 8 que se refieren al procedimiento adoptado para su colocación in situ.

El elemento central de la ataguía estaba constituído por un sólido esqueleto compuesto de siete marcos horizontales formados de vigas de acero y de madera, ligados por piezas verticales y arriostrados en todas direcciones. Estos marcos tenían por misión resistir la presión exterior que les trasmitían las tablestacas que formaban la pared interior de la ataguía.

Dichas tablestacas eran de madera, de pino brasil compuestas de tablones de 5 x 30 centímetros de escuadría, superpuestos de modo de formar piezas de un espesor variable desde un mínimo de 10 centímetros en el extremo superior hasta un máximo de 20 en el inferior. Los tablones estaban colocados en forma de dejar en los bordes laterales de cada tablestaca, ranuras y lengüetas que aseguraban una unión estanca con las tablestacas contiguas; y estaban asegurados unos con otros con clavos y bulones en cantidad suficiente para poder considerar cada tablestaca como una sola pieza a los efectos de su resistencia a la flexión. Este tipo de tablestaca es una variante del descrito en "A practical treatise of subaqueous foundations" de C. E. Fowler, con el nombre de sistema Wakefield.

Casi toda esta parte de la obra fué construída con ayuda del dispositivo representado en las figuras 5, 6, 7 y 8 constituído por dos flotadores de 16 metros de longitud, que soportaban en sus extremos dos fuertes vigas tendidas de uno a otro, de manera de dejar un espacio libre de doce metros de ancho por catorce de longitud, dentro del cual se construyó la ataguía. A tal efecto se

comenzó por construir el marco inferior, manteniéndolo suspendido a flor de agua por medio de cuatro polipastos fijos en los puntos A, B, C y D y accionados por guinches colocados sobre los flotadores; y sobre dicho marco se construyó luego el resto del esqueleto, colocándose además cierto número de tablestacas — aproximadamente la quinta parte del total — convenientemente espaciadas de manera de servir luego de guías para la hinca de las restantes.

El sistema de guinches y polipastos permitió ir descendiendo paulatinamente la estructura a medida que su peso aumentaba, con el fin de aliviar, mediante su inmersión, la carga trasmitida a los flotadores.

Durante toda esta primera etapa del trabajo, el equipo flotante, con su carga, permaneció constantemente amarrado a una de las pilas ya construídas, al pié de la cual existía una profundidad suficiente para permitir el trabajo aún en niveles próximos al estiaje. Así fué como pudo ejecutarse toda esa etapa de la construcción sin que las variaciones del nivel del río afectaran el desarrollo de la misma.

Mientras se daba término a estos trabajos, se procedió a regularizar el fondo del río en el emplazamiento de la fundación, nivelando el material suelto que cubría la roca y registrando su espesor en distintos puntos a lo largo del perímetro de la fundación, a fin de determinar exactamente la profundidad a que deberían hincarse las tablestacas.

Terminada la construcción de la estructura central de la ataguía, los flotadores fueron remolcados hasta el lugar del trabajo; y fijada aquella en posición exacta mediante cuatro cables accionados desde las orillas, se hizo descender por medio de los polipastos hasta apoyar sobre el fondo regularizado.

Acto continuo se procedió sin pérdida de tiempo a colocar las tablestacas restantes, que una vez hincadas hasta la roca, fueron fijadas mediante bulones al esqueleto, después de lo cual las tablestacas de guía, fueron a su vez clavadas y aseguradas en igual forma en su nueva posición También se hincaron, en los puntos de intersección de los puntales de los marcos, algunos pilotes (señalados con círculos rayados en la planta de la estructura) que abulonados luego al esqueleto, ofrecieron nuevos puntos de apoyo para el mismo. Hecho esto, y para aumentar provisoriamente la

estabilidad de la ataguía se colocó en su parte superior un entablonado sobre el cual se depositaron alrededor de ochenta toneladas de bloques de piedra.

Hasta este momento, los flotadores habían sido mantenidos en su posición de trabajo junto a la ataguía, en condiciones de permitir el retiro de la misma si una brusca variación del nivel del río lo hubiera hecho necesario. Terminada la colocación del lastre de bloques, y puestos en tensión los cables de amarre, los flotadores fueron retirados para completar la construcción de la ataguía.

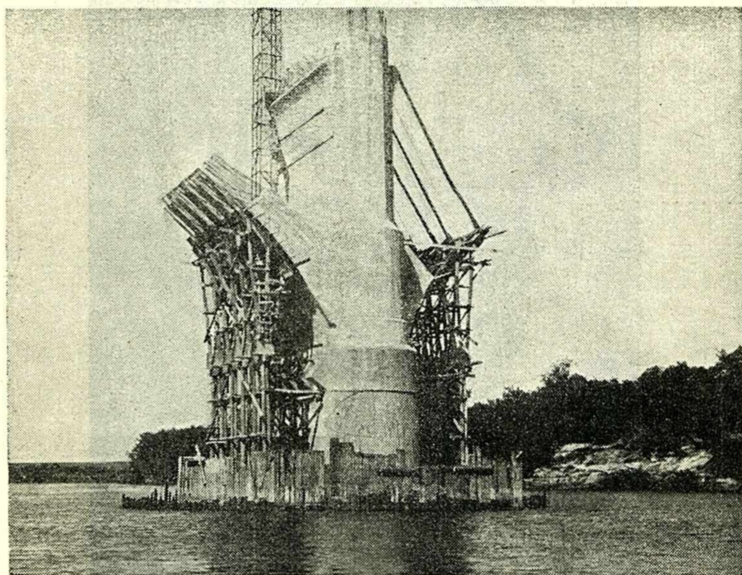


Fig. 9. — Vista de la pila III terminada. A la izquierda se vé una sección del arco, construída junto con la pila y a la derecha, los encofrados para la sección simétrica de la anterior.

Con este fin, utiliznado tablestacas de acero, se construyó en torno del cajón central una cintura cilíndrica de 18 metros de diámetro. El material del fondo, en el espacio entre el cajón y esa cintura, fué retirado mediante grapos o por succión por medio de bombas; y en su lugar se colocaron cuatro capas de bolsas de arcilla, rellenando luego todo el espacio restante con arcilla suelta, bien apisonada. Para evitar que durante esta operación

se deformara la cintura exterior, a causa de las diferencias de presión provenientes del desigual espesor del relleno, se colocaron pequeños puntales entre el cajón interior y la cintura, especialmente cerca de las esquinas del cajón, donde esas deformaciones eran más probables

Por último, aprovechando la existencia en obra de grandes cantidades de piedra arenisca proveniente de excavaciones anteriormente ejecutadas, se construyó en torno de la cintura exterior

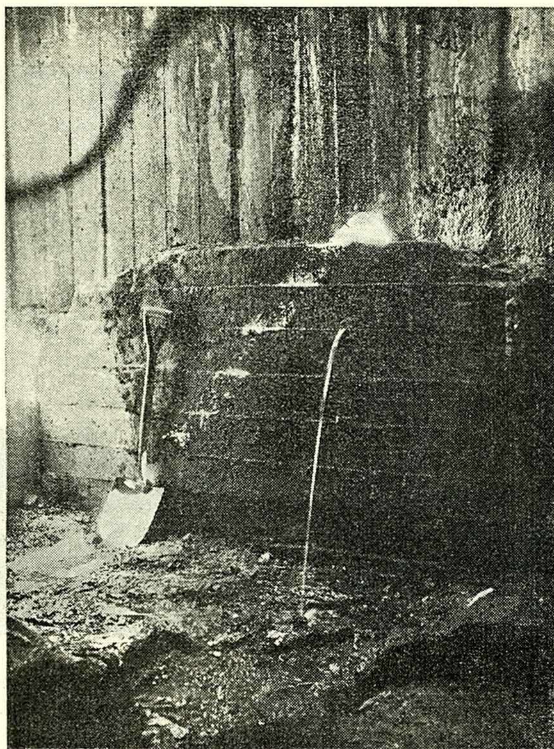


Fig. 10. — Interior de la ataguía, con el muro perimetral terminado.

un enrocamiento destinado a aumentar la estabilidad del conjunto. De esta manera el cajón interior de la ataguía vino a quedar enclavado en una especie de islote artificial, protejido contra la erosión, bien anclado al terreno, y cuyo peso era suficiente para resistir al empuje de la corriente.

Restaba por último ejecutar el sellado de la ataguía a la roca del banco; y se atribuía especial importancia a esta operación, porque de ella dependía que pudiera realizarse con la prolijidad y la rapidez necesarias la excavación de la roca del banco hasta la capa fisurada de que ya hemos hablado; y eventualmente la consolidación de esa capa, si sus características lo aconsejaban, o aún mismo su eliminación.

Con ese fin se comenzó por extraer el agua de la ataguía hasta algo más abajo del marco inferior, para lo cual se utilizó un equipo de cuatro bombas centrífugas de una capacidad global de setecientos metros cúbicos por hora. A continuación, en los espacios que quedaban libres entre las vigas perimetrales y los puntales de los marcos, se construyeron con tablestacas de madera, pequeñas ataguías que permitieron aislar por secciones la pared interior del cajón. El material y el agua extraída de estos recintos eran volcados en el interior de la ataguía principal. Así se pudo llegar en cada una de esas secciones hasta el banco de roca, sobre el cual, previa una completa limpieza de su superficie, se construyó contra la pared interior de la ataguía y hasta el nivel del marco inferior un muro de hormigón ciclópeo, con cemento de endurecimiento rápido. Un corte transversal de ese muro puede verse en A, en la figura 8. Cada una de las secciones de muro tenía sólo 2m50 de longitud; y como el trabajo fué organizado de manera que, en cada uno de los lados del cajón, hubiera en un mismo instante una sola sección en construcción, resultó relativamente fácil evitar la deformación de la parte inferior de la ataguía y hacer frente a las entradas de agua que durante ese trabajo se produjeron.

Terminadas estas operaciones, y extraída luego toda el agua y el material suelto que aún quedaba en la ataguía, pudo comprobarse que, con la construcción del muro perimetral, habían sido practicamente eliminada toda filtración entre la ataguía y el terreno. Al mismo tiempo el muro de hormigón proporcionó un nuevo medio de consolidación de la ataguía, pués por medio de anclajes empotrados en el mismo pudo asegurarse la estructura con cables y tensores bastante resistentes para impedir todo movimiento en caso de inmersión total prolongada.

Fué entonces posible atacar la excavación de la roca, que se inició abriendo un pozo en cada uno de los lados del perímetro

hasta llegar a la zona fisurada, a una profundidad aproximada de dos metros. Se había previsto el caso de que fuera necesario retirar todo el material blando o demasiado fisurado de esa zona, aún mismo debajo del muro perimetral, que se pensaba consolidar en caso necesario por un procedimiento análogo a los métodos corrientes de submuración. Pero el exámen directo del terreno mostró que las fisuras eran muy pequeñas y las filtraciones de poca importancia; en vista de lo cual se juzgó suficiente consolidar esa parte del banco mediante la inyección de una lechada de cemento.

A tal efecto, y con el fin de no demorar la construcción del macizo de fundación, se colocaron sobre la roca, en posición vertical, caños de hierro de 90 mm. de diámetro, que se prolongaron hacia arriba hasta 80 centímetros por encima del nivel de estiaje. Estos caños, en número de once, debían permitir luego ejecutar perforaciones de 70 mm. de diámetro dentro de la zona fisurada, hasta una profundidad de 1m50 por debajo de la excavación, e inyectar luego el cemento en la forma prevista.

En esta forma se pudo iniciar de inmediato la colocación del hormigón, que prosiguió regularmente, sin más demoras que las impuestas por la necesidad de retirar los marcos de la ataguía a medida que la construcción se elevaba. Se llenó primero con hormigón ciclópeo todo el espacio comprendido dentro del muro perimetral, colocándose luego por encima, en toda el área de la ataguía, una capa de regularización, del mismo material, de un metro de espesor. Sobre esta capa se asentó después el patín de hormigón armado, que quedó de tal manera colocado a menor profundidad que la prevista en el proyecto y cuya construcción resultó por eso mismo más fácil. Se terminó luego el resto de la fundación tal como se indica en la fig. 2. Al mismo tiempo se construyeron los muretes laterales que aparecen en dicha figura y que estaban destinados a servir de apoyo a los andamios para el montaje de las cimbras de los bóvedas.

Alcanzado el nivel superior de la fundación, se ejecutaron de inmediato las perforaciones previstas; y se continuó luego la construcción de la pila. Terminada ésta, se procedió a ejecutar el tratamiento del terreno, para lo cual se inyectaron, por medio de una bomba reciprocante, lechadas de cemento de densidad creciente, a una presión máxima de 4 kgs/cm^2.

Este procedimiento permitió hacer penetrar en el terreno alrededor de cuatro mil litros de lechada de dosaje variable entre 1:6 y 1:10, en volumen. La cantidad máxima inyectada en una perforación fué de mil litros; la mínima, de cincuenta.

A manera de comentario final sobre el proceso constructivo que acabamos de describir, diremos que su aplicación en Paso del Puerto ha permitido comprobar su eficacia como medio de ejecutar fundaciones en seco frente a condiciones locales que pueden calificarse de difíciles. En particular, el procedimiento empleado para el cierre de la junta entre el borde inferior de la ataguía y el suelo de fundación, mediante un muro perimetral, dió resultados altamente satisfactorios. En nuestra opinión, si se introducen en él las variantes necesarias para adaptarlo a cada caso particular, puede ser empleado en muchas obras análogas, con ventajas, — para nuestro medio, — sobre otros procedimientos preconizados para solucionar aquel problema, que es uno de los que más preocupan a los constructores de obras hidráulicas.

Entre estos procedimientos citaremos uno, que en muchos aspectos se asemeja al que hemos expuesto, y cuya descripción fué publicada en la revista "Engineering News - Record" en su número de Agosto 3 de 1939, un año después de iniciados los trabajos de fundación a que se refiere este artículo. En dicho método, aplicado en la construcción de un puente sobre el río Quinnipiac en New Haven, se recurre también a un muro perimetral para obtener un sellado hermético del borde inferior de la ataguía; pero las excavaciones en roca necesarias para la construcción de ese muro, dentro de la ataguía principal, son ejecutadas totalmente por buzos, provistos de picos y palas, que colocan luego los encofrados para la construcción del muro; y éste es después ejecutado con hormigón inmergido. Las entradas de agua por debajo de la ataguía fueron totalmente eliminadas, demostrando así la eficacia del procedimiento. Es dudoso, no obstante, que esa solución pueda ser intentada con éxito en un medio como el nuestro, en el que la escasez y a veces la carencia de equipos y de personal especializado de la naturaleza dc los que se requieren para el procedimiento mencionado, limitan grandemente sus posibilidades de aplicación.

Dejando de lado este aspecto particular del proceso constructivo aplicado en Paso del Puerto, y examinando en conjunto los dispositivos adoptados, nos parece necesario señalar que en la solución de muchos de sus detalles influyeron sensiblemente las notorias dificultades que ya desde hace algunos años, se han hecho sentir en nuestro país para la obtención de elementos materiales indispensables para la industria de la construcción. Baste decir que no fué posible obtener del extranjero, dentro de plazos razonables, ofertas por tablestacas de acero tipo Larssen u otro similar, que se proyectaba emplear en la construcción del cajón interior, razón por la cual se adoptó el tipo de tablestaca de madera ya descrito. De igual manera, para la construcción del recinto cilíndrico exterior, sólo fué posible conseguir en la plaza tablestacas planas de tres tipos distintos, y eso en cantidad que resultó con todo insuficiente, debiendo completarse con tablestacas compuestas, preparadas en la obra.

Creemos que el procedimiento indicado presentaría todas las ventajas que de él pueden esperarse, solamente en el caso de que se dispusiera de los materiales adecuados para cada uno de los dispositivos que el procedimiento comprende, en forma de obtener de cada una de las operaciones el máximo rendimiento unido a la máxima seguridad. Y como en tal caso el costo del equipo sería evidentemente elevado, su empleo quedaría limitado a obras de cierta importancia en que el número de fundaciones similares a construir fuera relativamente grande.